

É possível efeito Doppler mesmo sem movimento relativo entre fonte e observador?

Gildo Luiz de Sales Neto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Mossoró, RN, Brasil

E-mail: gildoluizsalesneto@gmail.com

Marcelo Nunes Coelho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Mossoró, RN, Brasil

E-mail: marcelo.coelho@ifrn.edu.br

Introdução

O efeito Doppler, tal como é apresentado em textos de nível médio, analisa o que acontece com a frequência observada caso haja movimento relativo entre uma fonte de ondas e um observador.

Para o caso de ambos, observador e fonte, se moverem, temos que [1]

$$f_{obs} = f_{fonte} \frac{v \pm v_{obs}}{v \pm v_{fonte}} \quad (1)$$

Nessa equação temos que f_{obs} é a frequência percebida pelo observador; f_{fonte} é a frequência original da fonte; v_{obs} é a velocidade do observador em relação ao meio; v_{fonte} a velocidade da fonte em relação ao meio e v , a velocidade de propagação da onda naquele meio, respectivamente, em relação ao meio (o sinal considerado para v_{obs} e v_{fonte} é positivo se apontar no sentido observador \rightarrow fonte). Essa equação mostra de forma muito clara que, caso o movimento relativo entre fonte e observador seja de aproximação, a frequência observada será maior que a frequência da fonte. O contrário ocorre caso o movimento relativo seja de afastamento.

Contudo, em geral, os textos para Ensino Médio [1-3] consideram apenas a situação em que fonte e observador estão no mesmo meio. De

uma maneira mais geral, é possível que fonte e observador estejam em meios diferentes e interessa-nos saber como a frequência observada varia em função da velocidade do observador e da fonte em relação aos seus meios e da velocidade do som em relação a esses mesmos meios.

Será possível haver efeito Doppler mesmo sem movimento relativo entre fonte e observador? E será possível não haver efeito Doppler mesmo que haja movimento relativo?

As respostas a essas perguntas podem ser fornecidas ao analisarmos a situação em que fonte e observador se encontram em meios diferentes. O que aconteceria se o observador e a fonte estivessem em meios diferentes onde as ondas também se propagam com velocidades diferentes? Considere a situação descrita na Fig. 1.

Nesse caso, fonte e observador foram colocados em meios diferentes. A fonte, então, emite ondas com uma frequência f_{fonte} e que se propagam com velocidade v_1 no meio 1 e v_2 no meio 2. Interessa-nos saber qual a frequência f_{obs} detectada pelo observador.

Para resolver esse problema, vamos considerar a interface que separa os dois meios (marcada pela letra I na Fig. 1). A onda produzida pela fonte, ao atravessar a interface, refratará, alterando sua

velocidade. A frequência, entretanto, não se altera na mudança de meio.

Por causa disso, vamos dividir o problema em duas etapas: i) Calculamos a frequência detectada pela interface por causa do movimento da fonte. ii) Calculamos a frequência detectada pelo observador por causa

do movimento dele, considerando a interface como a fonte das ondas.

Ao fazer isso, consideramos a interface como observador na etapa i) e como fonte emissora na etapa ii). Por consequência, dividimos o problema original em dois problemas, cada um acontecendo

Estudando o efeito Doppler no Ensino Médio, consideramos a situação em que fonte e observador estão no mesmo meio. De uma maneira mais geral, é possível que fonte e observador estejam em meios diferentes, e a frequência observada pode variar em função da velocidade do observador e da fonte em relação aos seus meios

Este texto analisa um caso especial do efeito Doppler quando observador e fonte estão se movendo em meios diferentes. É possível perceber, a partir de uma análise simples, que nessa situação há a possibilidade de ocorrência do efeito Doppler mesmo quando a fonte e o observador estão em repouso um em relação ao outro. Também notamos que é possível que não ocorra Doppler mesmo que haja movimento relativo entre fonte e observador.

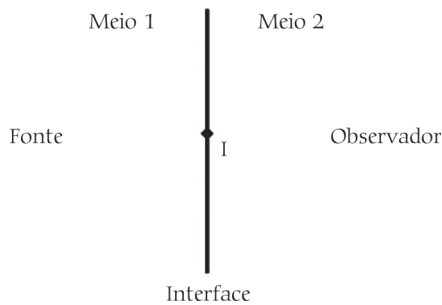


Figura 1: Uma fonte emissora de ondas está situada no meio 1. Um observador está situado no meio 2. A interface, imóvel, entre os dois meios é representada por I.

em um único meio.

Como cada etapa envolve apenas um meio, podemos utilizar a expressão geral para o efeito Doppler, exibida acima (Eq. (1)). Primeiro, a frequência percebida pela interface (f_{inter}) por causa do movimento da fonte é calculada por

$$f_{inter} = f_{fonte} \frac{v_1 \pm v_{inter}}{v_1 \pm v_{fonte}}$$

Como a interface não se move em relação a qualquer meio, $v_{inter} = 0$ e a equação fica

$$f_{inter} = f_{fonte} \frac{v_1}{v_1 \pm v_{fonte}} \quad (2)$$

Lembrando que v_1 é a velocidade da onda no meio 1. Agora vamos considerar a segunda etapa, em que a fonte emissora

é a interface e o observador perceberá uma frequência f_{obs} diferente por causa de seu próprio movimento. Aplicando a equação geral, temos

$$f_{obs} = f_{inter} \frac{v_2 \pm v_{obs}}{v_2 \pm v_{inter}}$$

Mais uma vez, como a interface não se move, a equação assume a forma

$$f_{obs} = f_{inter} \frac{v_2 \pm v_{obs}}{v_2} \quad (3)$$

Substituindo f_{inter} dessa última equação pela expressão que encontramos na etapa 1, ficamos com

$$f_{obs} = f_{fonte} \frac{v_1}{v_1 \pm v_{fonte}} \times \frac{v_2 \pm v_{obs}}{v_2} \quad (4)$$

Não ocorre efeito Doppler mesmo quando há movimento relativo

Observe, a partir da equação deduzida acima, que a frequência percebida só será igual à frequência emitida pela fonte se

$$\frac{v_1}{v_1 \pm v_{fonte}} \times \frac{v_2 \pm v_{obs}}{v_2} = 1$$

Conclui-se que, para $f_{obs} = f_{fonte}$ (situação em que não há efeito Doppler),

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\pm v_{fonte}}{\pm v_{obs}} \quad (5)$$

A razão v_1/v_2 é sempre positiva (tendo em vista que consideramos o módulo da velocidade da onda no respectivo meio). Se fonte e observador estiverem se mo-

vendo no mesmo sentido, seus sinais serão iguais e, portanto, a razão à direita será positiva.

Como a velocidade da onda no meio 1 é diferente da velocidade da onda no meio 2, para que $f_{obs} = f_{fonte}$, a velocidade da fonte, v_{fonte} , será necessariamente diferente da velocidade do observador, v_{obs} . Ou seja, para que *não haja efeito Doppler* é necessário que as velocidades do observador e da fonte sejam diferentes. Sendo assim, é possível não haver efeito Doppler mesmo havendo movimento relativo.

Ocorre efeito Doppler quando a velocidade relativa é nula

Considerando as velocidades do observador e da fonte como sendo iguais e não nulas ($v_{obs} = v_{fonte} = v \neq 0$), temos que

$$f_{obs} = f_{fonte} \frac{v_1 (v_2 \pm v)}{v_2 (v_1 \pm v)}$$

Uma vez que $v_2 \neq v_1$, o termo variável é diferente de 1. Logo, há efeito Doppler (variação na frequência) mesmo quando não há movimento relativo entre observador e fonte. Caso o observador e a fonte estejam parados, $v = 0$, $f_{obs} = f_{fonte}$ não havendo efeito Doppler. Logo, para que o efeito não aconteça, ou a velocidade do observador e da fonte são nulas ou obedecem à proporção da Eq. (5).

Essa equação confirma o que é dito nos livros de física do Ensino Médio: se observador e fonte tiverem velocidades nulas, a frequência percebida será a mesma, independentemente do meio onde se

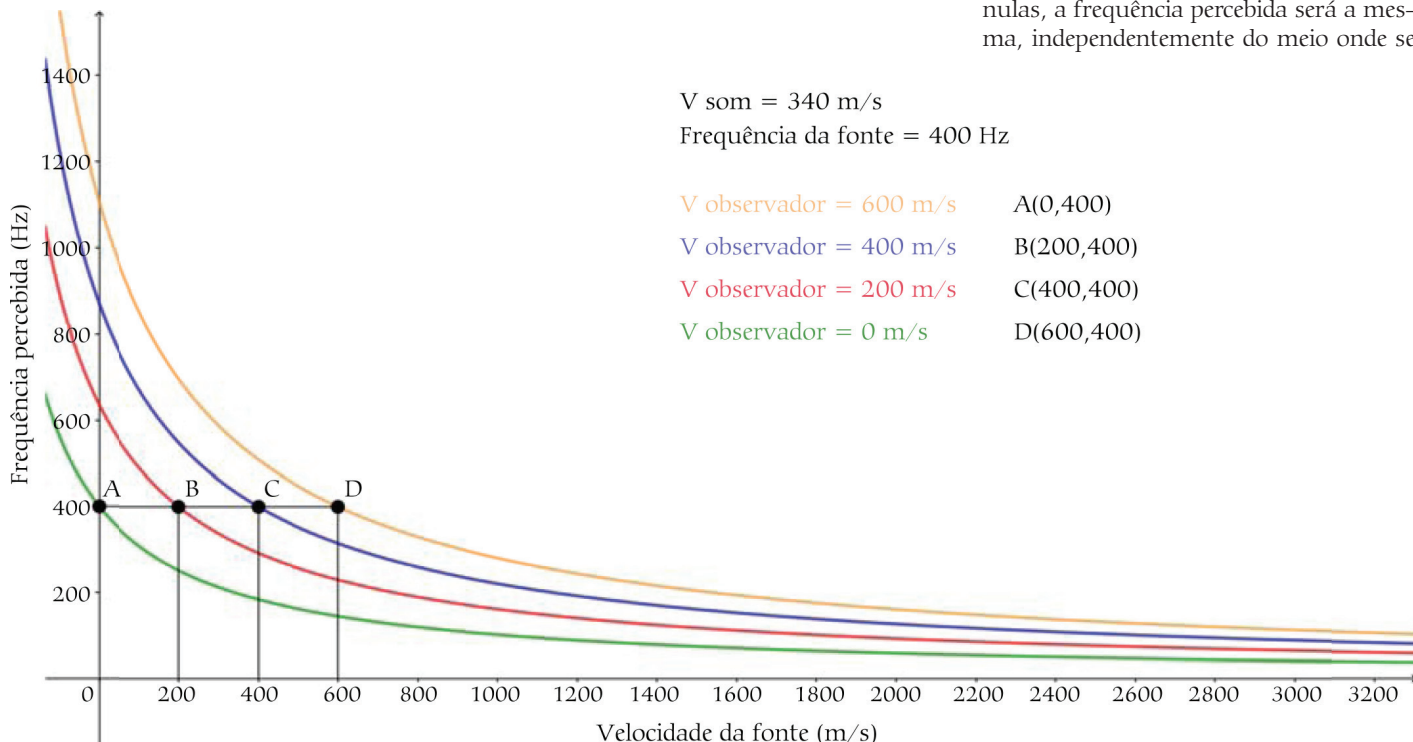


Figura 2: Gráfico da frequência percebida vs. velocidade da fonte para o caso de observador e fonte estarem no mesmo meio.

encontram.

Porém, no caso de observador e fonte estarem em meios diferentes, ter velocidade relativa nula não é condição suficiente para que percebam a mesma frequência.

Outro ponto digno de nota é o caso em que a fonte está parada e o observador se move, ou vice-versa. Nesse caso, um dos fatores da Eq. (4) assumirá o valor de 1. Ou seja, para o caso de o observador, por exemplo, não se mover, só nos interessa saber a velocidade de propagação do som no meio da fonte. Sendo assim, só é importante conhecer a velocidade do som no meio em que há movimento (do observador ou da fonte).

Para efeito de comparação, analisaremos como se comporta a frequência percebida pelo observador em função do movimento relativo fonte-observador por meio de gráficos nas duas situações a seguir (em ambos os casos, observador e fonte movem-se no mesmo sentido).

Nesses gráficos, a velocidade do observador é constante em cada curva (valores da velocidade do observador estão indicados na figura), sendo a velocidade da fonte o termo variável, representado no eixo das abscissas. No eixo das ordenadas consta a frequência percebida pelo observador em função do movimento da fonte.

Além disso, o segmento de reta paralelo ao eixo x representa as situações em que não há efeito Doppler. Logo, a interseção das curvas com esse segmento mos-

tra o caso em que a frequência percebida é igual à emitida, que foi escolhida arbitrariamente como 400 Hz.

Primeiro, vamos analisar a situação que envolve um único meio de propagação (Fig. 2). A frequência percebida para um mesmo meio, como dito acima, será igual quando fonte e observador tiverem a mesma velocidade. Olhando no gráfico, a frequência percebida só é de 400 Hz quando $v_{obs} = v_{fonte}$. Na curva verde, por exemplo, a frequência percebida é de 400 Hz quando v_{fonte} é igual a 200 m/s, que corresponde à velocidade do observador relativo a essa curva. Logo, velocidade relativa ser nula é condição suficiente para não haver efeito Doppler, desde que no mesmo meio.

Contudo, quando os meios (da fonte e do observador) são diferentes, a verificação é outra (Fig. 3). A frequência só não varia se a razão entre as velocidades de propagação da onda nos dois meios for igual à razão entre as velocidades da fonte e do observador, conforme indicado na Eq. (5).

O ponto A mostra a situação onde ambos estão parados. Conforme se espera, a frequência percebida é a mesma que foi emitida. Porém, nos pontos B, C e D, onde também não ocorre variação na frequência, fica claro a partir do gráfico que as duas velocidades não são iguais. As coordenadas desses pontos foram colocadas no lado direito do gráfico.

Ao fazermos a razão entre v_{fonte} e v_{obs} , verificaremos a proporção. No caso desse gráfico, $v_1 = 1500$ m/s e $v_2 = 340$ m/s. Aplicando a Eq. (5), temos

$$\frac{1500}{340} = \frac{882,35}{200} = \frac{1764,71}{400} = \frac{2647,06}{600} = 4.412$$

Além disso, a velocidade da onda em um dado meio só influencia na frequência percebida se houver movimento nesse meio (da fonte ou do observador). Logo, caso haja um meio intermediário separando fonte e observador, ou até mesmo n meios intermediários (Fig. 4), a velocidade do som nesses meios não influenciará no resultado, tendo em vista que não há movimento em nenhum deles.

A verificação disso é bastante simples: basta considerar as duas etapas utilizadas neste trabalho para se determinar a Eq. (4). Ao se fazer isso, como não há movimento nesses meios intermediários, restará

$$\frac{v_{intermediário} \pm 0}{v_{intermediário} \pm 0}$$

Como esse fator vale 1, a frequência percebida não será alterada.

Uma vez que não há movimento nos meios 2 e 3, a frequência não mudará nesse trecho. Ou seja, as únicas velocidades de propagação que nos interessam são aquelas do meio 1, onde está a fonte, e a do meio 4, onde está o observador. Os

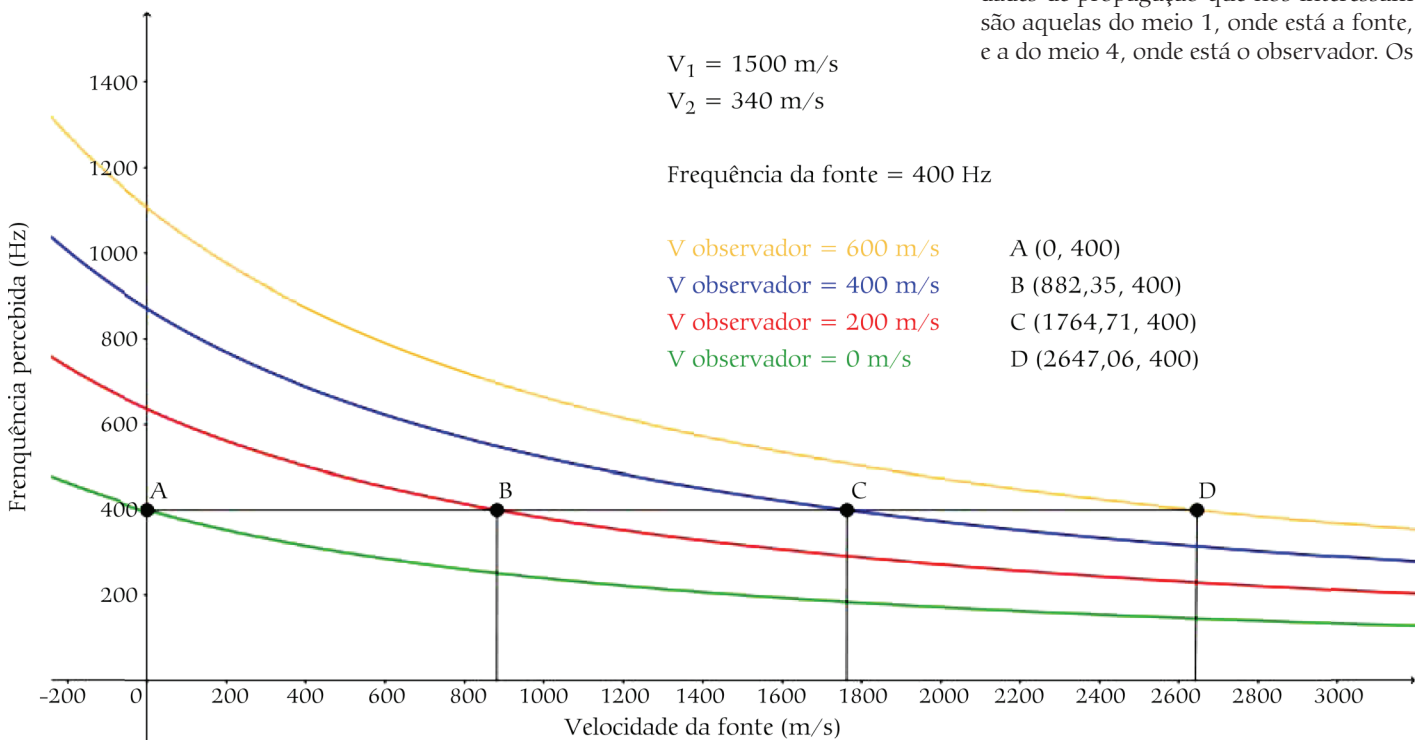


Figura 3: Gráfico da frequência percebida vs. velocidade da fonte para o caso de observador e fonte estarem em meios diferentes. A fonte encontra-se no meio 1; o observador, no meio 2.

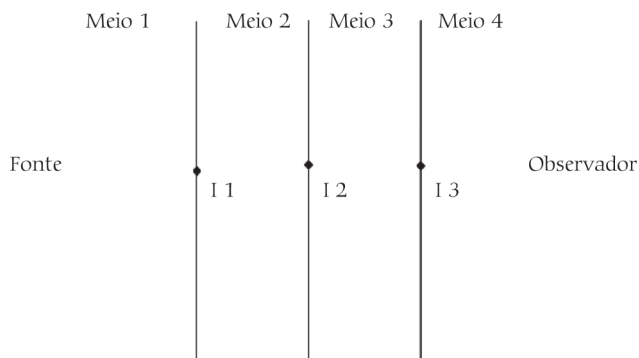


Figura 4: Caso em que há meios de propagação diferentes separando fonte e observador. As interfaces são marcadas por I1, I2 e I3.

meios intermediários vão apenas mudar o intervalo de tempo entre a emissão da onda e sua percepção pelo observador, sem gerar efeito algum na altura do som.

Conclusão

Por intermédio da extensão do fenômeno Doppler para meios diferentes, é possível determinar um conjunto de ideias

que incluem aquelas observadas para o caso de um mesmo meio, além de algumas outras. Consequentemente, a Eq. (4) é uma equação mais geral para o efeito Doppler, implicando a equação apresentada nos livros de Ensino Médio como um caso particular.

Comprova-se que, de fato, se observador e fonte estiverem parados em

relação aos meios, a frequência percebida pelo observador é a mesma que a frequência emitida pela fonte, mesmo quando fonte e observador se encontram em meios diferentes.

Um resultado importante diz respeito à condição para não ocorrência do efeito Doppler. A condição de velocidade relativa nula entre a fonte e o observador somente é válida quando as velocidades de propagação do som nos dois meios forem iguais. Caso não sejam, tal condição passa a ser de que a razão entre as velocidades nos dois meios seja igual à razão entre as velocidades da fonte e do observador conforme expresso na Eq. (5).

Finalmente, a velocidade de propagação em um meio somente influencia a frequência percebida se houver movimento da fonte ou do observador nesse meio. Logo, caso existam outros meios entre a fonte e o observador, o efeito Doppler é dependente apenas das velocidades de propagação do som nos meios onde estão imersos a fonte e o observador.

Referências

- [1] N.V. Bôas, R.H. Doca e G.J. Biscoula, *Física 2: Termologia, Ondulatória e Ótica* (Editora Saraiva, São Paulo, 2016).
- [2] K. Yamamoto e L.F. Fuke, *Física para o Ensino Médio* (Editora Saraiva, São Paulo, 2016), v. 2.
- [3] A. Máximo, B. Alvarenga e C. Guimarães, *Física: Contexto e Aplicações* (Editora Scipione, São Paulo, 2016), v. 2.
- [4] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física II: Termodinâmica e Ondas* (Addison Wesley, São Paulo, 2008).
- [5] D. Halliday, J. Walker e R. Resnick, *Fundamentos de Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), v. 2.
- [6] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Edgard Blucher, São Paulo, 2002), v. 2.